



Sulfures polymétalliques

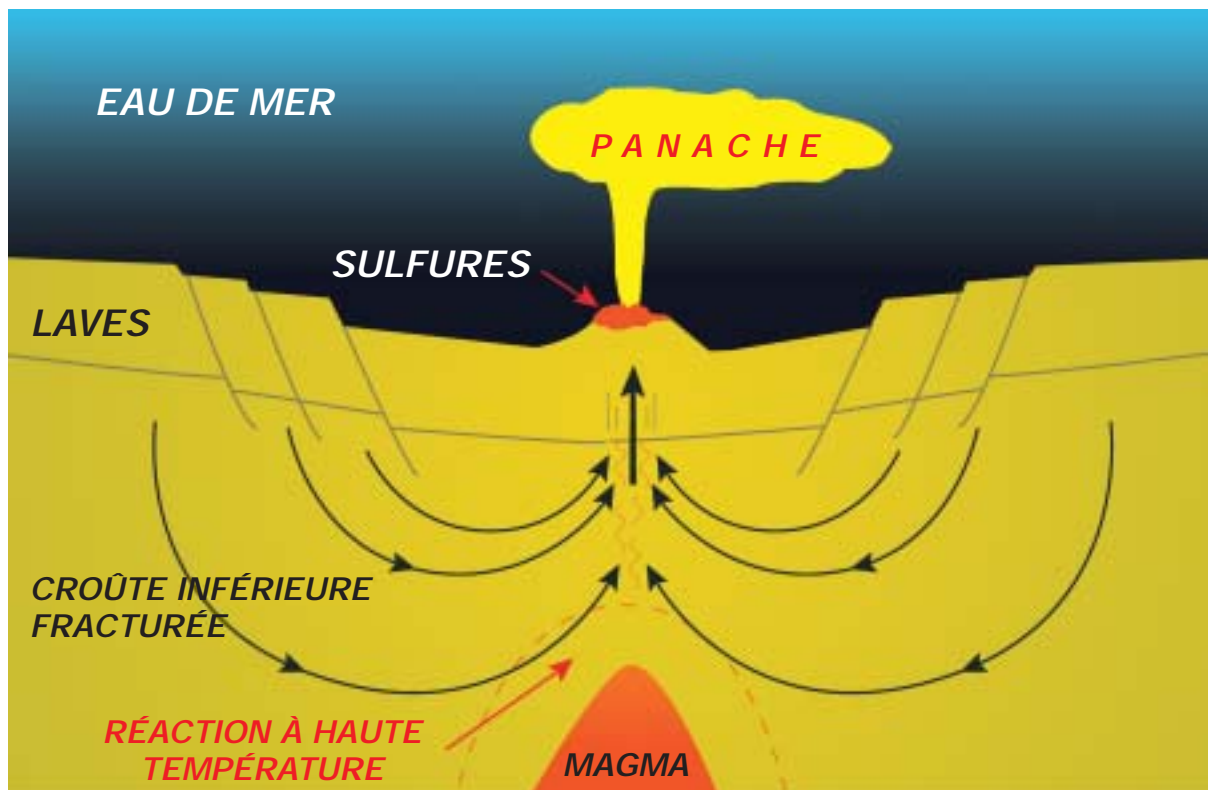
- Répartition des sites
- Possibilités d'exploitation
- Environnement
- Recherche, exploration et avenir

Découverte et formation

En 1979, sur la dorsale Est-Pacifique, par 21° de latitude N, au large de la Basse-Californie (Mexique), les scientifiques qui exploraient les fonds sous-marins ont découvert des formations de roche noire de type cheminée, dressées sur des monts de sulfure, crachant de l'eau à haute température et abritant sur leurs flancs des espèces animales ne ressemblant à aucune autre espèce connue. Depuis, des études ont montré que ces complexes de fumeurs noirs résultaient de la mise en place de la croûte océanique nouvelle par expansion des fonds sous-marins, sous l'action des plaques tectoniques qui, sous la surface de la terre, se déplacent en un mouvement convergent ou divergent. Cette activité est en outre étroitement associée à la formation de gisements minéraux métalliques dans le fond de l'océan.

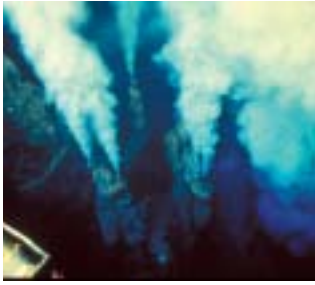
À des profondeurs pouvant aller jusqu'à 3 700 mètres, des fluides hydrothermaux, qui résultent de l'infiltration de l'eau

de mer dans les chambres souterraines où elle est chauffée par la roche en fusion (magma) présente sous la croûte terrestre, s'échappent des fumeurs noirs à des températures pouvant atteindre 400° Celsius. Lorsque ces fluides se mélangent à l'eau de mer froide, les métaux qu'ils contiennent précipitent sous forme de sulfures sur les cheminées et sur le fond océanique environnant. Ces sulfures, qui se composent de galène (plomb), sphalérite (zinc) et chalcopryrite (cuivre) s'accumulent sur le fond de l'océan ou juste au-dessous. Les gisements de sulfures massifs ainsi formés peuvent atteindre des tailles allant de plusieurs milliers à quelque 100 millions de tonnes. La teneur élevée de certains d'entre eux en métaux communs (cuivre, zinc, plomb) et surtout en métaux précieux (or, argent) a suscité récemment l'intérêt de l'industrie minière internationale. On trouve aussi nombre de gisements de sulfures polymétalliques sur des sites où il n'y a plus d'activité volcanique.



Formation de sulfures au fond de l'océan. (Peter Rona)

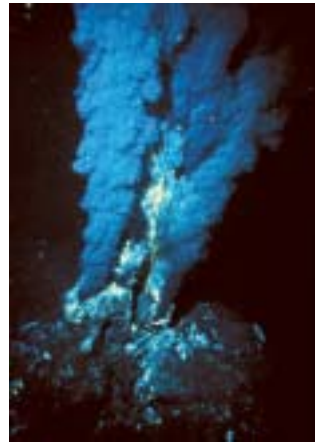
Répartition des sites



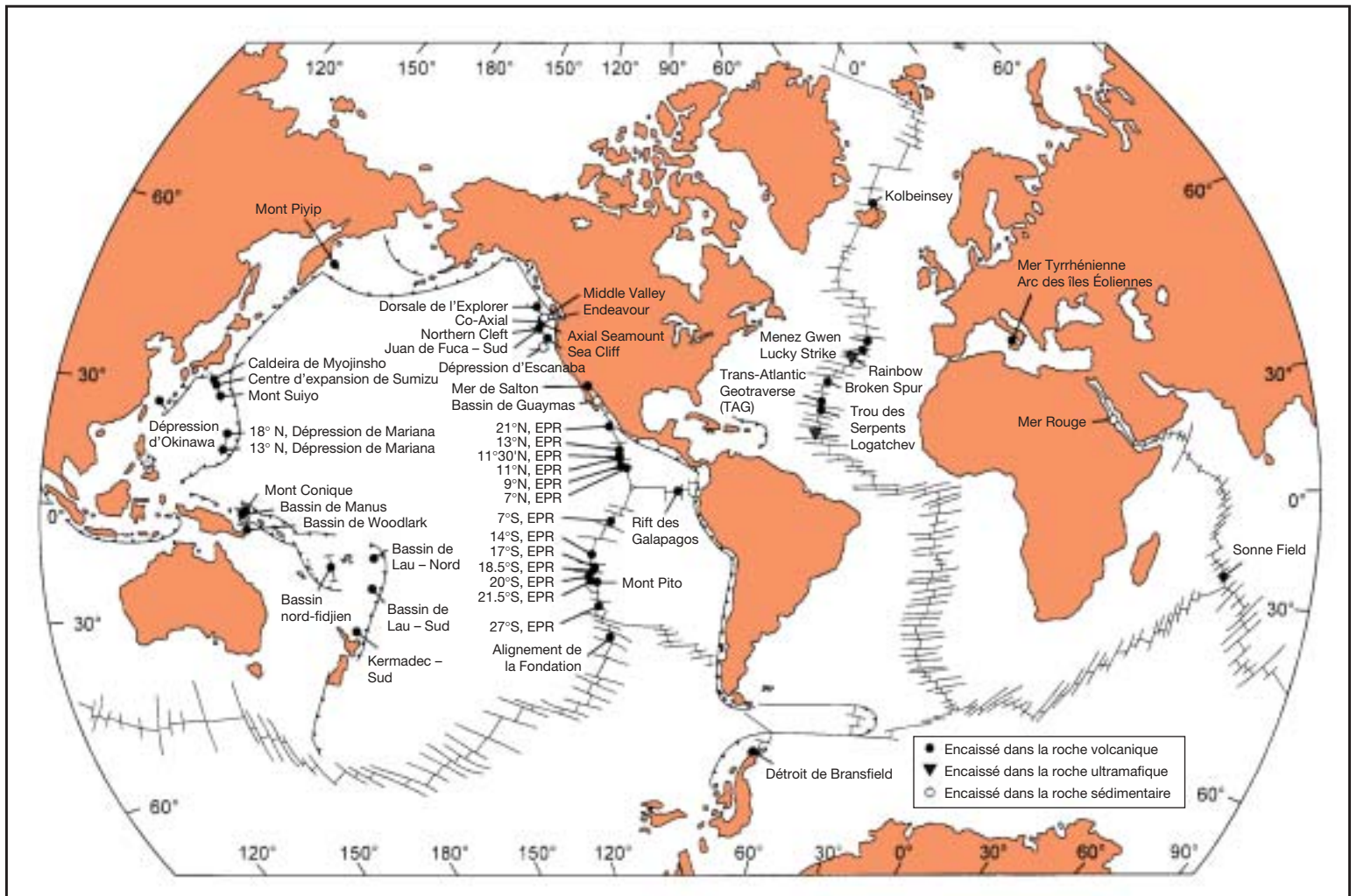
La plupart des sites se situent au milieu de l'océan, sur les dorsales Est-Pacifique, Sud-Est-Pacifique et Nord-Est-Pacifique. Plusieurs gisements ont aussi été repérés sur la ride médio-Atlantique mais un seul site a jusqu'ici été identifié dans l'océan Indien. Si l'on n'a relevé que peu de gisements sulfurés sur la dorsale médio-Atlantique et la dorsale de l'océan Indien central, c'est surtout parce que ces zones n'ont pas fait l'objet d'une prospection aussi poussée. Sur les 60 000 kilomètres de dorsales océaniques qui existent dans le monde, 5 % seulement environ ont fait l'objet d'observations et de recherches tant soit peu détaillées.

Au milieu des années 80, de nouveaux gisements de sulfure ont été signalés dans le sud-ouest du Pacifique, au niveau des marges océaniques, au point de rencontre des bassins et des rides, entre le continent et les arcs insulaires volcaniques. Dans ces zones que l'on appelle centres d'expansion des bassins d'arrière-arc, le magma monte à proximité de la surface aux

marges de convergence qui se forment lorsqu'une plaque tectonique se glisse sous une autre selon un phénomène appelé subduction. Ces découvertes ont été à l'origine d'une vaste prospection des bassins marginaux et des systèmes d'arc et d'arrière-arc de l'ouest et du sud-ouest du Pacifique qui a permis de découvrir de nouveaux gisements dans le bassin de Lau, le bassin nord-fidjien, à l'est de l'Australie, et la fosse d'Okinawa au sud-ouest du Japon. En 1991, on a constaté que de vastes gisements de sulfures étaient liés au volcanisme felsique - un volcanisme caractérisé par d'intenses éruptions explosives et d'importants dégagements de cendres - notamment dans le bassin de Manus, au nord de la Nouvelle-Calédonie. Des gisements hydrothermaux ont également été identifiés à peu de distance, dans le bassin de Woodlark, une région où l'expansion du fond marin se propage dans la croûte continentale, à l'est de la Papouasie-Nouvelle-Guinée. On a recensé plus de 100 sites de minéralisation hydrothermale, dont 25 au moins comportent un système de fumeurs noirs à haute température.



Fumeurs noirs dans le bassin de Lau (Peter Herzig)



Localisation des systèmes hydrothermaux et des dépôts de sulfures polymétalliques sur le plancher océanique récent (Peter Herzig)

Teneur en métal



Minerais sulfurés (Peter Herzig)

La comparaison de près de 1 300 analyses chimiques de sulfures des fonds marins fait apparaître des différences de composition entre les gisements selon les contextes volcaniques et tectoniques. Par rapport à des échantillons prélevés sur les dorsales médio-océaniques pauvres en sédiments (573 échantillons), les sulfures massifs qui se forment dans les laves basaltiques et andésitiques aux centres d'expansion d'arrière-arc sont caractérisés par des teneurs moyennes élevées en zinc (17 %), plomb (0,4 %) et baryum (13 %) mais une teneur faible en fer. Les sulfures polymétalliques des failles arrière-arc de la croûte continentale ont eux aussi une faible teneur en fer mais sont souvent riches en zinc (20 %) et en plomb (12 %) et ont une teneur élevée en argent (1,1 % ou 2,304 g/t) (40 échantillons). En règle générale, la composition des gisements sulfurés des fonds marins dans divers environnements tectoniques dépend de la nature des roches volcaniques qui leur ont donné naissance par lessivage.

De fortes concentrations d'or ont été trouvées récemment dans des échantillons de sulfures provenant de centres d'expansion d'arrière-arc alors que sur les dorsales médio-océaniques, le titre moyen des gisements en or ne dépasse pas 1,2 g/t (1259 échantillons). Les sulfures du bassin d'arrière-arc de Lau titrent parfois jusqu'à 29 g/t en or, la moyenne s'établissant à 2,8 g/t (103 échantillons). La fosse d'Okinawa renferme des gisements dont la teneur en or peut atteindre 14 g/t (en moyenne 3,1 g/t, 40 échantillons) dans une faille arrière-arc à l'intérieur de la croûte continentale. Les premières analyses de sulfures du Bassin de Manus-Est font apparaître des titres de 15 g/t, le maximum étant de 55 g/t (26 échantillons). De fortes teneurs en or allant jusqu'à 21 g/t ont été trouvées dans les cheminées à barytine du Bassin de Woodlark. Le gisement le plus riche en or trouvé à ce jour est situé sur le Guyot Conical dans les eaux territoriales de la Papouasie-Nouvelle-Guinée, près de l'île de Lihir. Les échantillons recueillis (40 échantillons) sur le plateau qui forme le sommet de ce mont sous-marin (2,8 kilomètres de diamètre de base à 1 600 mètres de profondeur, culminant à 1 050 mètres) titrent jusqu'à 230 g/t, la moyenne étant de 26 g/t soit environ dix fois la teneur moyenne des gisements aurifères terrestres dont l'exploitation est jugée rentable.

Tonnage estimatif

Les estimations obtenues pour plusieurs gisements des dorsales médio-océaniques varient de 1 à 100 millions de tonnes. Il est toutefois difficile d'évaluer la continuité de l'affleurement des sulfures et l'on connaît généralement mal l'épaisseur des gisements. Ceux qui sont de loin les plus considérables se trouvent sur des dorsales océaniques éteintes et fortement sédimentées, mais ayant encore une activité hydrothermale. Dans le cadre du programme international Ocean Drilling, des forages du gisement recouvert de sédiments dans la Middle Valley, dans la partie nord de la dorsale de Juan de Fuca, au nord-ouest des États-Unis, ont révélé la présence de 8 à 9 millions de tonnes de sulfures. Les forages pratiqués jusqu'à une profondeur de 125 mètres sur le monticule hydrothermal actif Trans-Atlantic Geotraverse (TAG), situé à 3 650 mètres de profondeur sur la dorsale médio-atlantique par 26° de latitude N, ont montré qu'il existait quelque 2,7 millions de tonnes de sulfures au-dessus du fond marin et 1,2 million de tonnes environ dans le stockwork sous le fond océanique. On n'a pas encore découvert dans les fonds marins de mines de sulfures massifs aussi importantes que celles de Kidd Creek au Canada (135 millions de tonnes) ou de Neves Corvo au Portugal (262 millions de tonnes).

Le plus vaste gisement marin de sulfures que l'on connaisse est celui d'Atlantis II Deep en mer Rouge, qui a été découvert plus de 10 ans avant le premier fumeur noir sur la dorsale du Pacifique-Est. Il est formé de boues métallifères plutôt que de sulfures massifs. D'après une évaluation détaillée, ce gisement de 40 kilomètres carrés contient 94 millions de tonnes de minerai sec, à raison de 2,0 % de zinc, 0,5 % de cuivre, 39 g/t d'argent et 0,5 g/t d'or, soit un poids total de métaux précieux avoisinant 4 000 tonnes d'argent et 50 tonnes d'or. Un essai pilote d'extraction exécuté à 2 000 mètres de profondeur a montré que ce gisement pouvait être exploité dans de bonnes conditions de rentabilité.

Possibilités d'exploitation



Section transversale d'une cheminée sulfurée (Peter Herzig)

L'exploitation minière sous-marine semble réalisable dans certaines conditions. Dans l'idéal, il faut: 1) une forte teneur en métaux communs et/ou un titre élevé en or, 2) un site pas trop éloigné de la terre, 3) une faible profondeur ne dépassant pas 2 000 mètres (bien que l'on dispose de techniques d'extraction minière en eau profonde). L'extraction de sulfures massifs peut alors être rentable, compte tenu du fait que le système minier est entièrement portatif et peut être déplacé d'un site à un autre. Les investissements consacrés au matériel d'exploitation et aux navires ne sont pas liés à un emplacement donné comme c'est le cas sur terre où l'installa-

tion d'une mine dans une région isolée, avec toutes les infrastructures nécessaires, exige une mise de fonds importante.

L'extraction de sulfures massifs se fera probablement sur des zones de dimensions relativement restreintes et aura lieu essentiellement à la surface des fonds marins (exploitation par décapage) ou sous la surface à une faible profondeur (exploitation par excavation) pour prélever les monts de sulfure et les champs de cheminées à la surface et les corps minéralisés de remplacement dans le stockwork juste au-dessous de la surface du fond marin.

Recherche, exploration et future exploitation minière

Des universités et des organismes publics du monde entier mènent des recherches scientifiques sur les gisements de sulfures polymétalliques et les écosystèmes qui y sont associés. Les pays les plus avancés dans ce domaine sont l'Australie, le Canada, la France, l'Allemagne, le Japon, la Fédération de Russie, le Royaume-Uni et les États-Unis. L'Italie et le Portugal se sont aussi dotés de programmes de recherche.

L'exploration se fait à l'aide de navires de recherche polyvalents ultramodernes qui mettent en oeuvre des techniques de pointe (matériel de cartographie bathymétrique, submersibles habités ou [véhicules téléguidés](#), systèmes de photographie et de vidéo et appareils de forage et de prélèvement d'échantillons). Le matériel de forage et de carottage devra être amélioré afin de permettre des forages ayant jusqu'à 100 mètres de profondeur. On n'a pas encore mis au point de systèmes d'exploitation minière spécialement conçus pour les gisements de sulfures. Il est probable que ceux-ci consisteront essentiellement en des systèmes de dragage et remontée en continu équipés de têtes coupantes rotatives, la pulpe de minerai étant chargée sur des minéraliers qui la transporteront jusqu'à une usine de traitement.

La réglementation future

L'Autorité internationale des fonds marins examine actuellement la question de la réglementation des activités de prospection et d'exploration des gisements de sulfures polymétalliques et des encroûtements cobaltifères situés dans les fonds océaniques au-delà des limites de la juridiction nationale. Cette question a été examinée pour la première fois quant au fond en août 2002 par les 36 membres que compte le Conseil de l'Autorité et par la Commission juridique et technique. C'est la Fédération de Russie qui en a saisi l'Autorité en 1998. En 2001, le secrétariat, se fondant sur les observations formulées par les spécialistes ayant participé à [un atelier organisé par l'Autorité en 2000](#), a défini un ensemble partiel de clauses types. Au cours de l'atelier, l'accent a été mis tout particulièrement sur la nécessité de protéger les écosystèmes contre les effets néfastes de l'exploration puis, à terme, de l'exploitation minière.

Plusieurs questions se posent, notamment celles de savoir si les deux catégories de ressources visées devraient ou non faire l'objet de règlements distincts et en quoi ces règlements devraient différer de celui applicable aux nodules polymétalliques, approuvé par l'Autorité en 2000. Le système d'exploitation minière dit « parallèle » envisagé par la Convention sur le droit de la mer, selon lequel les secteurs alloués aux [sociétés minières contractantes](#) sont répartis à parts égales entre ces sociétés et l'Autorité, a été conçu pour l'exploitation des nodules. Or, ceux-ci sont éparpillés sur de vastes zones pouvant être divisées plus équitablement que ce n'est le cas des gisements de sulfures polymétalliques et des encroûtements cobaltifères, lesquels se présentent sous forme plus regroupée, sont répartis de manière plus inégale et ont une teneur en métal qui varie davantage selon les sites. En outre, la plupart des gisements de sulfures et des encroûtements découverts à ce jour se trouvent dans des zones relevant de la juridiction des États, ce qui signifie que l'exploitation de ces minerais dans la zone internationale serait en concurrence avec la mise en valeur de ces mêmes ressources dans les zones sous juridiction nationale. Une solution qui a été proposée consisterait pour l'Autorité, plutôt que d'exploiter elle-même ces ressources, à conclure des accords d'entreprise conjointe avec les sociétés minières.

L'Autorité continuera d'examiner la question en 2003.

Environnement

Les [événements hydrothermaux](#) associés aux gisements de sulfures massifs abritent toute une faune jusqu'alors inconnue. À la différence de toutes les autres formes de vie sur terre, qui dépendent directement ou indirectement de la lumière du soleil et de la photosynthèse pour leur énergie, les espèces hydrothermales vivent dans un bain d'eau à haute température chargée en hydrogène sulfuré, une substance chimique mortelle pour la plupart des autres animaux. Dans cet environnement vivent, dans des tubes qu'ils sécrètent, des vers de deux mètres de long dépourvus de système digestif et qui tirent leur énergie de micro-organismes capables d'oxyder le méthane et les sulfures. Quelque 500 espèces animales encore inconnues il y a peu ont été découvertes dans les champs d'évents.



Cheminée sulfurée et annélides tubicoles

Lorsqu'on planifiera des activités de prospection et d'exploitation minières, il faudra tenir compte de la singularité et de la fragilité de cet écosystème géographiquement fragmenté et de l'intérêt qu'il présente pour l'étude du métabolisme ainsi que de l'évolution et de l'adaptation des espèces. Des études ont montré que la faune qui peuple ces zones était capable de s'adapter aux changements brutaux qui caractérisent les milieux volcaniques actifs. Cette capacité d'adaptation s'explique peut-être par la présence d'une « population mère » capable de recoloniser une aire bouleversée. Toutefois, si la population souche est détruite par des activités minières, des espèces rares pourraient disparaître.

L'impact sur l'environnement de l'exploitation des gisements de sulfures serait en grande partie analogue à celui de l'extraction des nodules polymétalliques, à savoir notamment destruction des surfaces peuplées, ensevelissement de la faune sous les sédiments remués et changement de la composition chimique du milieu du fait de la présence au fond de l'eau d'un panache de particules en suspension. Toutefois, la densité élevée des particules de sulfures provoquera la resédimentation immédiate de tous les débris sulfurés arrachés par l'équipement de forage. En raison de la grande superficie exposée à l'eau de mer, une partie des matériaux sulfurés libérés subira une oxydation analogue à celle que subissent les sulfures massifs inactifs dans de nombreux gisements des fonds marins. Le drainage minier acide, qui pose de graves problèmes d'environnement dans les mines d'extraction de sulfures terrestres posera peu de problèmes ici par suite de la dilution dans l'eau de mer. En outre, la plupart des gisements de sulfures des fonds marins ne présentent pas une couverture sédimentaire importante. En conséquence, l'extraction minière de certains gisements de sulfures des fonds marins, en particulier des gisements inactifs qui n'abritent aucune faune hydrothermale, est réalisable et ne devrait pas avoir sur l'environnement un impact plus important que la construction d'installations portuaires classiques.